

AVALIAÇÃO DA ACURÁCIA VERTICAL DE MODELOS DIGITAIS DE ELEVAÇÃO (MDEs) PARA O ESTADO DO RIO DE JANEIRO ATRAVÉS DE ALGORITMOS DE AUTOMATIZAÇÃO

Raphael e Silva Girão

Universidade do Estado do Rio de Janeiro, Faculdade de Geologia
Laboratório de Estudos Tectônicos - Rio de Janeiro/RJ, Brasil
raphaelgirao@hotmail.com

Raúl Sanchez Vicens

Universidade Federal Fluminense, Departamento de Geografia
Laboratório de Geografia Física - Niterói/RJ, Brasil
rvicens@gmail.com

Pedro José Farias Fernandes

Universidade Federal Fluminense, Departamento de Geografia
Laboratório de Geografia Física - Niterói/RJ, Brasil
pjf_fernandes@yahoo.com.br

Leonardo Vieira Barbalho

Universidade do Estado do Rio de Janeiro, Faculdade de Engenharia
Departamento de Engenharia Cartográfica - Rio de Janeiro/RJ, Brasil
leo-barbalho@bol.com.br

RESUMO

O objetivo do presente estudo é avaliar a acurácia vertical dos MDEs oriundos do SRTM, ASTER GDEM, Topodata e SRTM EMBRAPA para o estado do Rio de Janeiro com base no PEC e no PEC-PCD e, para isso, desenvolver dois algoritmos que permitam, a partir de software livre, a automatização dos procedimentos para tal avaliação. A escolha do estado do Rio de Janeiro como área a ser analisada é justificada por sua heterogeneidade topográfica e por permitir uma avaliação regional dos MDEs. Uma vez que a acurácia vertical dos MDEs oriundos de sensoriamento remoto varia espacialmente, há a necessidade de se avaliar a acurácia vertical dos MDEs para cada nova área a ser estudada, portanto os algoritmos desenvolvidos nesse estudo foram eficientes na automatização dos procedimentos para tal avaliação, consistindo assim, em ferramentas importantes para a redução do tempo de avaliação e escolha do melhor MDE a ser utilizado. A avaliação dos MDEs mostrou que o SRTM obteve os melhores resultados de acurácia vertical para estado do Rio de Janeiro, contudo o ASTER GDEM foi o que obteve resultados de acurácia vertical mais relevantes em relação à configuração do terreno.

Palavras-chave: Acurácia Vertical; Modelos Digitais de Elevação; Algoritmo.

VERTICAL ACCURACY EVALUATION OF DIGITAL ELEVATION MODELS (DEMS) FOR THE STATE OF RIO DE JANEIRO THROUGH AUTOMATION ALGORITHMS

ABSTRACT

The aim of this study is to evaluate the vertical accuracy of the DEMs from the SRTM, ASTER GDEM, Topodata and SRTM EMBRAPA for Rio de Janeiro state based on the PEC and PEC-PCD and to develop two algorithms that allow the automation of the procedures for such evaluation. The choice of the state of Rio de Janeiro for an area to be analyzed is its topographic heterogeneity and that allows a regional evaluation of the DEMs. The vertical accuracy of the DEMs from remote sensing varies spatially, so it is necessary to evaluate the vertical accuracy of the DEMs for each new area to be studied. Therefore the algorithms developed in this study were efficient in the automation of the procedures for such evaluation, consisting in important tools to

reduce the evaluation time evaluate and to choose the best DEM for each area. The evaluation of the DEMs showed that the SRTM obtained the best vertical accuracy results for the state of Rio de Janeiro, but the ASTER GDEM was the one that obtained more regular vertical accuracy results regarding the terrain configuration.

Keywords: Vertical Accuracy; Digital Elevation Models; Algorithm.

INTRODUÇÃO

É cada vez maior a disponibilidade de dados topográficos para os usuários de geoinformação, dentre esses dados, se destacam os Modelos Digitais de Elevação (MDEs). O MDE é um dos mais importantes dados nos trabalhos de análise geoespacial e se tornou fundamental em estudos geomorfológicos e hidrológicos (TOUTIN, 2004; ASSELEN e SEIJMONSBERGEN, 2006; STALEY *et al.*, 2006; FRANKEL e DOLAN, 2007; BLASCHKE, 2010; ANDERS *et al.*, 2011, VERHAGEN e DRAGUT, 2012; DRAGUT e EISANK, 2012; PATEL *et al.*, 2016). Wilson e Gallant (2000) afirmam que a partir dos MDEs é possível desenvolver modelagens hidrológicas e geomorfológicas, além de extrair informações sobre solos, vegetação, insolação, dentre outros, mas sempre limitado pelo refinamento da escala do MDE utilizado. É importante frisar, sobretudo, que, para esse trabalho, se considera o conceito mais genérico para MDEs, no qual os mesmos podem representar a existência de objetos não topográficos (prédios, construções, árvores) sobre a superfície do terreno, ou seja, os MDEs podem não representar somente a superfície terrestre, mas também objetos localizados nessa superfície.

Em países de grande dimensão territorial, como o Brasil, mapeamentos planialtimétricos sistemáticos de grande ou média escala demandavam um alto custo de recursos, tempo e trabalho (VALERIANO e ROSSETI, 2012). Contudo, a partir dos MDEs oriundos do sensoriamento remoto, tais mapeamentos podem ser efetuados em menor tempo e com menos recursos. Endreny *et al.* (2000) e Wilson (2012) apontam a superioridade dos MDEs oriundos de sensoriamento remoto em comparação com os MDEs gerados a partir de cartas topográficas tradicionais, já que o primeiro, em geral, consiste em uma superfície de levantamento mais detalhada. De acordo com Carvalho e Latrubesse (2004), os vazios de informação entre as curvas de nível nas cartas topográficas podem ocultar formas de relevo, suavizando acidentes topográficos e, por consequência, representando com menor precisão a verdade terrestre. E mais, Sampaio *et al.* (2012) afirmam que os MDEs oriundos de curvas de nível concentram muitos erros em áreas de baixa densidade ou de ausência de dados, como fundos de vales, áreas planas e linhas de cumeadas.

Atualmente, alguns MDEs oriundos de sensoriamento remoto estão disponíveis de forma gratuita e com grande abrangência global, destacando-se os produtos do *Shuttle Radar Topography Mission* (SRTM) e do *Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer Global Elevation Model* (ASTER GDEM), assim como os subprodutos gerados a partir do reprocessamento do primeiro, como o Topodata e o SRTM EMBRAPA.

A missão SRTM foi realizada em fevereiro de 2000 em uma parceria entre a *National Aeronautics and Space Administration* (NASA), o Centro Aeroespacial Alemão e a Agência Espacial Italiana. Os MDEs resultantes da missão SRTM foram disponibilizados pelo *United States Geological Survey* (USGS), e possuem resolução espacial de 1 arco-segundo (aproximadamente 30 m) para os Estados Unidos e de 3 arco-segundos (aproximadamente 90 m) para o resto do globo. Recentemente, MDEs SRTM com 1 arco-segundo (aproximadamente 30 m) para quase todo o resto do globo foram disponibilizados, mas os mesmos ainda apresentam muitas áreas com falta de informação. Os MDEs SRTM possuem como sistema de referência geodésica o WGS84 associado ao modelo geoidal EGM96, e estão em coordenadas geográficas com o valor de elevação em metros (FARR *et al.*, 2007).

Como desdobramento do lançamento dos dados SRTM, uma série de versões do mesmo vem sendo produzida para melhoria de suas características funcionais, através de técnicas de

reprocessamento e amostragem dos dados levantados. Com os dados que cobrem o Brasil, foi desenvolvido o Topodata, lançado em 2008 e revisado em 2011, e o SRTM EMBRAPA, lançado em 2005. O primeiro consiste em MDEs com espaçamento refinado para 1 arco-segundo (cerca de 30m), para tanto, foi feita a interpolação dos dados do SRTM por krigagem, em que os coeficientes geoestatísticos aplicados foram selecionados empiricamente entre diversas condições topográficas, tendo como critério a melhoria de representação das formas e feições geomorfológicas em esquemas de relevo sombreado e transectos (VALERIANO e ROSSETTI, 2012). O segundo, SRTM EMBRAPA, é fruto de pós-processamentos dos dados originais do SRTM visando a correção de imperfeições como depressões espúrias, picos anômalos e pontos ou áreas com ausência de dados. Dentre os pós-processamentos executados, destacam-se preenchimento de grandes depressões espúrias, remoção de picos e interpolação (MIRANDA, 2005).

Os dados do ASTER GDEM, lançados em 2009 e revisados em 2011, são frutos de uma ação conjunta do Ministério da Economia, Indústria e comércio do Japão com a NASA, resultando em MDEs com cerca de 30 metros de resolução espacial (1 arco-segundo), também tendo o WGS 84 como referência geodésica associado ao modelo geoidal EGM96. Esses MDEs são oriundos de pares estereoscópicos de imagens do ASTER, sensor VNIR (faixa do infravermelho próximo), a bordo do satélite TERRA (ANDERS, 2000).

Apesar de se apresentarem como relevante recurso, os MDEs demandam o conhecimento sobre sua acurácia vertical para sua utilização adequada. Para tal, se destacam dois instrumentos legais para avaliação da acurácia vertical no Brasil: o primeiro consiste no Decreto 89.817/84, que estabelece o Padrão de Exatidão Cartográfica (PEC); e o segundo consiste na Norma de Especificação Técnica para Aquisição de Dados Geoespaciais Vetoriais de Defesa da Força Terrestre, que estabelece o Padrão de Exatidão Cartográfica dos Produtos Cartográficos Digitais (PEC-PCD) (BRASIL, 2011). É importante destacar que nenhum desses instrumentos legais possui primazia sobre o outro, tendo em vista que ambos possuem amparo legal para coexistirem.

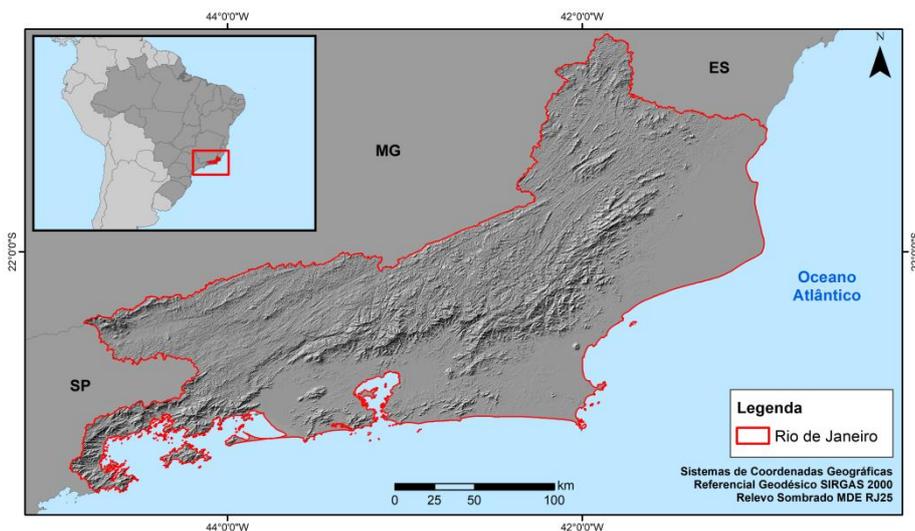
Alguns trabalhos já fizeram uma análise da acurácia vertical dos MDEs oriundos do SRTM, ASTER GDEM, Topodata e SRTM EMBRAPA com base no PEC e/ou no PEC-PCD: Santos *et al.* (2006) avaliaram os MDEs SRTM para uma área da região amazônica; Barros (2006) avaliou os MDEs do SRTM e ASTER para uma área entre os estados do Rio de Janeiro e São Paulo; Martins (2010) avaliou os MDEs do SRTM para o município de Salinópolis (PA); Miceli *et al.* (2011) avaliaram os MDEs do SRTM, ASTER GDEM, Topodata e SRTM EMBRAPA para uma área da região amazônica e para APA de Petrópolis (RJ); e Moura *et al.* (2014) avaliaram os MDEs do SRTM, ASTER GDEM e Topodata para as bacias hidrográficas do Rio Paranoá e do Rio São Bartolomeu. Contudo, somente o último utilizou a PEC-PCD na avaliação da acurácia vertical dos MDEs. Além disso, tais trabalhos fizeram uma avaliação da acurácia vertical dos MDEs para áreas de pequena/média extensão espacial, não superando 12.000 km², e caracterizadas por pouca diversidade do relevo. Sendo assim, uma vez que diversos trabalhos afirmam que a acurácia vertical dos MDEs oriundos de sensoriamento remoto variam espacialmente e que tal variação é em função, principalmente, da configuração topográfica do terreno e dos erros aleatórios vinculados à aquisição de dados e do seu processamento (TANG *et al.*, 2001; WECHSLER *et al.*, 2003; WECHSLER *et al.*, 2007; LINDSAY e EVANS, 2008; WILSON., 2012; MUKHERJEE *et al.*, 2013), há a necessidade de se avaliar a acurácia vertical dos MDEs para cada nova área a ser estudada, assim como também são de grande relevância trabalhos que avaliem a acurácia vertical dos MDEs oriundos de sensoriamento remoto em escala regional e em áreas com maior heterogeneidade topográfica.

Portanto, o objetivo do presente estudo é avaliar a acurácia vertical dos MDEs oriundos do SRTM, ASTER GDEM, Topodata e SRTM EMBRAPA para o estado do Rio de Janeiro com base no PEC e no PEC-PCD e, para isso, desenvolver dois algoritmos que permitam, a partir de software livre, a automatização dos procedimentos para tal avaliação. A escolha do estado do Rio de Janeiro como área a ser analisada é justificada por sua heterogeneidade topográfica e por permitir uma avaliação regional dos MDEs.

ÁREA DE ESTUDO

O estado do Rio de Janeiro (Figura 1), com território de aproximadamente 44.000 km², está localizado no extremo leste do Rift Continental do Sudeste do Brasil - RCSB (RICCOMINI, 1989; 1995), se estendendo da região de serras e de depressões interplanálticas correspondente ao vale do rio Paraíba do Sul à região dos maciços litorâneos, colinas e terrenos quaternários da Baía de Guanabara, de Jacarepaguá, de Sepetiba, da Região dos Lagos e da planície costeira de Campos. Sua geomorfologia é caracterizada por um contraste significativo das formas de relevo, produto da complexa evolução geológico-geomorfológica meso-cenozóica do sudeste brasileiro e, ainda, do processo acentuado de alteração da paisagem resultante das condições do regime climático tropical úmido (SILVA, 2002).

Figura 1 – Localização do estado do Rio de Janeiro.



MATERIAIS E MÉTODOS

MATERIAIS

Para o presente estudo, foram utilizados os seguintes materiais:

- MDEs SRTM v3, com resolução espacial de 3 arco-segundos (aproximadamente 90 metros), no formato *GeoTIF*, sistema de referência geodésica WGS84 associado ao modelo geoidal EGM96.
- MDEs ASTER GDEM, com resolução espacial de 1 arco-segundo (aproximadamente 30 metros), no formato *GeoTIF*, referência geodésica o WGS84 associado ao modelo geoidal EGM96.
- MDEs Topodata, com resolução espacial de 1 arco-segundo (aproximadamente 30 metros), no formato *GeoTIF*, referência geodésica o WGS84 associado ao modelo geoidal EGM96,
- MDEs SRTM EMBRAPA, com resolução espacial de 3 arco-segundos (aproximadamente 90 metros), no formato *GeoTIF*, referência geodésica o WGS84 associado ao modelo geoidal EGM96.
- 1.389 Pontos de Controle do projeto RJ25 (IBGE) com valores de altitudes ortométricas, em formato *shape (shp)*, datum horizontal SIRGAS2000 e datum vertical Imbituba, levantados em campo por GPS pelo método de posicionamento relativo estático, rastreados a partir de

pontos da rede fundamental do IBGE, onde o erro médio do ajustamento foi menor que 30 cm.

- Pontos cotados e curvas de nível do projeto RJ25 (IBGE), na escala 1:25.000, em formato *shape (shp)*, datum horizontal SIRGAS2000 e datum vertical Imbituba.

Optou-se por não executar a compatibilização dos modelos geoidais dos MDEs e dos Pontos de Controle, uma vez que Barros (2006) destaca que não foram detectadas maiores diferenças ao se comparar MDEs com a altitude ortométrica referenciada em Imbituba com MDEs com altitudes referenciadas no EGM96 na área de estudo, de forma que tais diferenças são, em média, de 0,54 metros. Trabalhos como de Luz *et al.* (2002), Ferreira (2008), Sánchez e Martínez (2008), de Freitas *et al.* (2010) e Ferreira (2011) confirmam tal comportamento, uma vez que demonstram que as diferenças entre a altitude ortométrica referenciada em Imbituba com altitudes referenciadas no EGM96 em outras regiões apresentam uma média de em torno de 0,30 metros.

PEC/PEC-PCD

As avaliações dos MDEs foram executadas com base no PEC (Decreto 89.817/84) e no PEC-PCD (Norma da Especificação Técnica para Aquisição de Dados Geoespaciais Vetoriais de Defesa da Força Terrestre). Ambos utilizam como parâmetros de avaliação a tolerância vertical (TV), que consiste em 90% dos valores das variações entre as altitudes do MDE e as altitudes de pontos de controle estarem dentro de um limite definido, e o erro médio quadrático (EMQ), que é calculado a partir da seguinte fórmula:

$$EMQ = \sqrt{\frac{\sum(Z_i - Z_t)^2}{n - 1}}$$

Onde:

Z_i = o valor altimétrico do MDE;

Z_t = o valor altimétrico do ponto de controle;

n = numero total de pontos de controle.

Segundo o PEC, os MDEs podem ser classificados em três classes: A, B e C. Para a classe A, 90% das variações entre as altitudes do MDE e as altitudes de pontos de controle devem ser de até metade da equidistância entre as curvas-de-nível e o EMQ deve ser de até um terço desta equidistância. Para a classe B, 90% das variações entre as altitudes do MDE e as altitudes de pontos de controle devem ser de até três quintos da equidistância entre as curvas-de-nível e o EMQ deve ser de até dois quintos desta equidistância. Para a classe C, 90% das variações entre as altitudes do MDE e as altitudes de pontos de controle devem ser de até três quartos da equidistância entre as curvas-de-nível e o EMQ deve ser de até a metade desta equidistância (Tabela 1).

Tabela 1 – Limiares de TV e do EMQ para cada classe do PEC para as escalas 1:50.000, 1:100.000 e 1:250.000.

Escala	1:50.000		1:100.000		1:250.000	
	TV	EMQ	TV	EMQ	TV	EMQ
A	10m	6,7m	25m	16,7m	50m	33,3m
B	12m	8m	30m	20m	60m	40m
C	15m	10m	37,5m	25m	75m	50m

O PEC-PCD classifica os MDEs em quatro classes: A, B, C e D. Os limiares estabelecidos para a classe A foram definidos a partir de estudos realizados por Merchant (1982) e Asselen (1989), de forma que 90% das variações entre as altitudes do MDE e as altitudes de pontos de controle

devem ser de até 0,27 vezes a equidistância entre as curvas-de-nível e o EMQ deve ser de até um sexto desta equidistância. As classes B, C e D correspondem, consecutivamente, às classes A, B e C do PEC (Tabela 2).

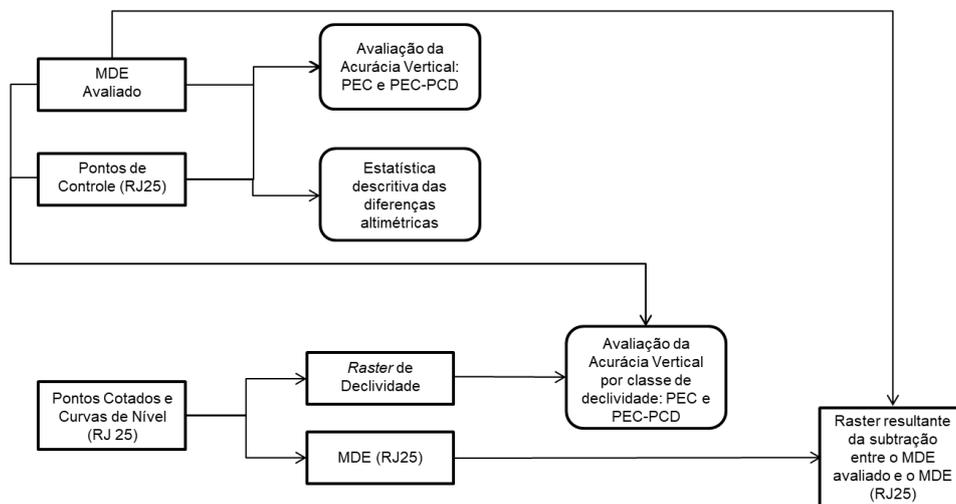
Tabela 2 – Limiares de TV e do EMQ para cada classe do PEC-PCD para as escalas 1:50.000, 1:100.000 e 1:250.000.

Escala	1:50.000		1:100.000		1:250.000	
	TV	EMQ	TV	EMQ	TV	EMQ
A	5,5m	3,33m	13,7m	8,33m	27m	16,67m
B	10m	6,7m	25m	16,7m	50m	33,3m
C	12m	8m	30m	20m	60m	40m
D	15m	10m	37,5m	25m	75m	50m

MÉTODO DE AVALIAÇÃO DA ACURÁCIA VERTICAL

A principal avaliação da acurácia vertical dos MDEs foi baseada nos parâmetros de avaliação do PEC e do PEC-PCD: TV e EMQ. Contudo, avaliações complementares também foram realizadas para compreender melhor as características de acurácia de cada MDE (Figura 2). A primeira avaliação complementar consiste no cálculo das estatísticas descritivas das diferenças relativas e absolutas entre os valores altimétricos dos MDEs e dos pontos de controle: valor mínimo e valor máximo, primeiro e terceiro quartis; mediana; média; e desvio padrão. A avaliação principal e essa primeira avaliação complementar foram executadas por meio dos algoritmos desenvolvidos para automatizar tais procedimentos.

Figura 2 – Fluxograma dos procedimentos executados na avaliação da acurácia vertical dos MDEs.



Outra avaliação complementar executada, com o objetivo de verificar o comportamento da acurácia vertical dos MDEs em relação ao tipo de relevo e à declividade, consiste no cálculo da acurácia vertical dos MDEs para cada faixa de declividade com base nos parâmetros de avaliação do PEC e do PEC-PCD e na análise da correlação entre a declividade e a acurácia vertical dos MDEs. Para tal, foi gerado um *raster* de declividade para a área de estudo com base nos pontos cotados e nas curvas de nível do projeto RJ25 (IBGE), para, na etapa seguinte, a partir do *shape* de pontos de controle, ser extraído a declividade para cada ponto de controle. Os pontos de controle foram então agrupados por faixas de declividade (Tabela 3) e foi executada a avaliação da acurácia vertical dos MDEs com base no PEC e no PEC-PCD para

cada faixa de declividade e também calculada a correlação linear entre a declividade e as diferenças altimétricas dos pontos de controle com os MDEs avaliados.

Tabela 3 – Faixas de Declividade (Adaptado de VALERIANO e ROSSETI, 2008).

Relevo	Faixa (%)
Plano	0 - 3
Suave Ondulado	3 - 8
Ondulado	8 - 20
Forte Ondulado	20 - 45
Montanhoso e Escarpado	Acima de 45

Por fim, a ultima avaliação complementar, realizada através de álgebra de mapas, se refere à subtração entre os MDEs avaliados e o MDE gerado a partir das curvas de nível e pontos cotados do projeto RJ25 (IBGE), que consiste em dados altimétricos numa escala de maior detalhe: 1:25.000 (Figura 3). Esse procedimento também foi executado em trabalhos como Mouratidis *et al.* (2010) e Hirt *et al.* (2010), de forma que o *raster* resultante é denominado de imagem diferença. A partir de tal procedimento, foi possível avaliar o comportamento espacial das diferenças altimétricas entre os MDEs avaliados e o MDE gerado a partir das curvas de nível e pontos cotados do projeto RJ25 (IBGE). Vale reforçar que o MDE gerado a partir das curvas de nível e pontos cotados do projeto RJ25 (IBGE), ainda que originado de dados em uma escala de maior detalhe, se trata de um MDE gerado por interpolação e possui acurácia vertical inferior aos pontos de controle. Ou seja, o MDE RJ25 possui uma acurácia vertical superior aos demais MDEs avaliados, mas ainda assim possui imprecisões relevantes em relação à realidade. Ressalta-se ainda que, para essa avaliação, todos os MDEs tiveram sua resolução espacial compatibilizadas para 1 arco-segundo (aproximadamente 30 metros).

Figura 3 – Álgebra de mapas entre o MDE avaliado e o MDE RJ25

MDE Avaliado	MDE RJ25	-	=	Imagem Diferença												
<table border="1" style="border-collapse: collapse; width: 60px; height: 60px;"> <tr><td style="text-align: center;">155</td><td style="text-align: center;">110</td></tr> <tr><td style="text-align: center;">80</td><td style="text-align: center;">65</td></tr> </table>	155	110	80	65	-	<table border="1" style="border-collapse: collapse; width: 60px; height: 60px;"> <tr><td style="text-align: center;">145</td><td style="text-align: center;">110</td></tr> <tr><td style="text-align: center;">65</td><td style="text-align: center;">70</td></tr> </table>	145	110	65	70	=	<table border="1" style="border-collapse: collapse; width: 60px; height: 60px;"> <tr><td style="text-align: center;">10</td><td style="text-align: center;">0</td></tr> <tr><td style="text-align: center;">15</td><td style="text-align: center;">-5</td></tr> </table>	10	0	15	-5
155	110															
80	65															
145	110															
65	70															
10	0															
15	-5															

DESENVOLVIMENTO DOS ALGORITMOS DE AUTOMATIZAÇÃO DA AVALIAÇÃO DA ACURÁCIA VERTICAL DOS MDES COM BASE NO PEC E NO PEC-PCD

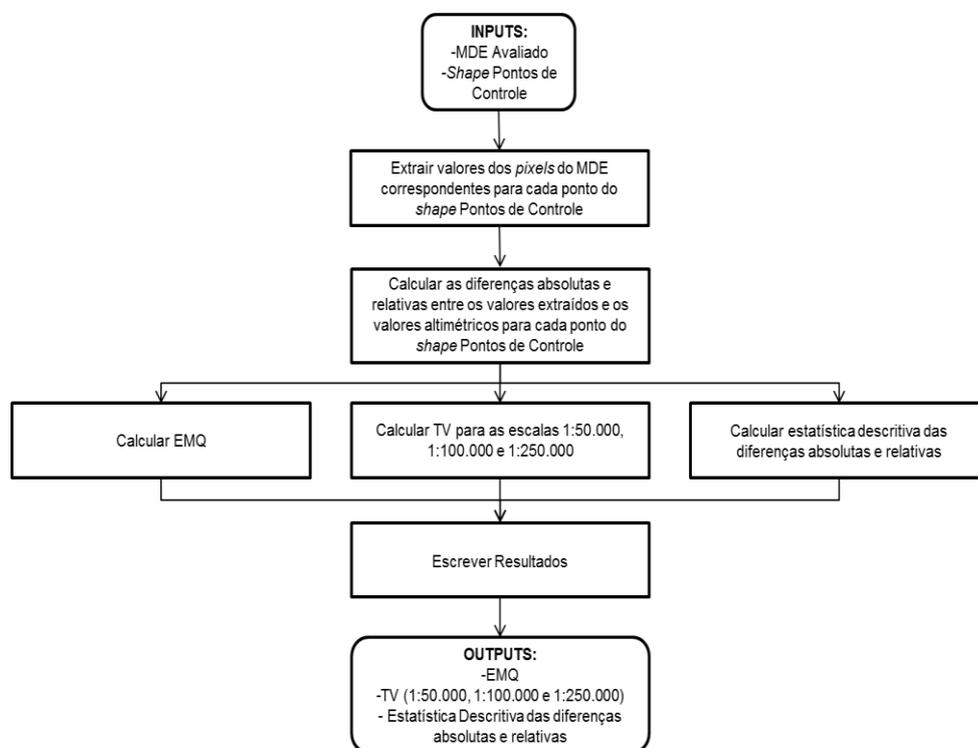
Conforme já mencionado, a acurácia vertical dos MDEs oriundos de sensoriamento remoto varia espacialmente, de forma que há a necessidade de se avaliar a acurácia vertical dos MDEs para cada nova área a ser estudada. Portanto, foram desenvolvidos dois algoritmos que permitem, a partir de software livre, a automatização dos procedimentos da avaliação da acurácia vertical dos MDEs com base nos parâmetros do PEC e do PEC-PCD.

Com o surgimento de linguagens de alto nível disponíveis gratuitamente, o uso de linguagens de programação vem se popularizando no ambiente acadêmico, de modo que a linguagem R é um exemplo disso (MACÊDO e FLOQUET, 2017). O sistema R é distribuído livremente e é formado por uma interface gráfica mais a linguagem em si. O R se destaca por possuir um abundante material instrutivo disponível em diversas fontes de sites e livros, além de ter compatibilidade com outras linguagens de programação, como: C, C++, Fortran, Java e Python (MACÊDO e FLOQUET, 2017). No que tange às geociências, apesar de ser comumente utilizada para estatística, a linguagem R passou a também ser utilizada para estudos voltados para análises espaciais e geoestatística (GROHMANN, 2004; METCALFE *et al.*, 2015; KOBAL *et al.*, 2013; PATEL e VARGAS, 2014; BROWN, 2016).

Outro ponto relevante sobre o R é a existência do ambiente de desenvolvimento RStudio (RStudio Team, 2015), que possui uma interface amigável e de fácil experimentação para novos usuários. O RStudio consiste em uma interface de desenvolvimento integrado (IDE), que inclui ferramentas e edição e suporte à linguagem R. O mesmo já possui varias bibliotecas embutidas, contudo também há pacotes disponíveis para download desenvolvido para análises específicas e distribuídos gratuitamente (MACÊDO e FLOQUET, 2017). No caso do presente estudo, foram utilizados os seguintes pacotes: raster (HIJMANS, 2015), que permite a análise de dados espaciais regulares (*rasters*); e o rgdal (BIVAND *et al.*, 2016), que permite operações com sistemas de projeção.

O algoritmo proposto para esse estudo deve calcular o EMQ do MDE avaliado; a TV para as escalas 1:50.000, 1:100.000 e 1:250.000; e as estatísticas descritivas das diferenças relativas e absolutas entre os valores altimétricos dos MDEs e dos pontos de controle (valor mínimo e valor máximo, primeiro e terceiro quartis; mediana; média; e desvio padrão). Dessa forma, foram desenvolvidos dois algoritmos, um para o PEC e outro para o PEC-PCD, contudo as operações dos dois algoritmos desenvolvidos podem ser representadas por um único diagrama (Figura 4).

Figura 4 – Diagrama dos algoritmos desenvolvidos.



Ambos os algoritmos funcionam da mesma forma, somente os limiares para cada classe do PEC e do PEC-PCD são diferentes. Os inputs devem ser o MDE avaliado e o *shape* de pontos de controle. A primeira etapa consiste da extração do valor do pixel do MDE correspondente à geolocalização de cada ponto de controle. Uma vez que se tenha, para cada ponto de controle, o seu valor altimétrico levantado em campo e o valor altimétrico correspondente ao pixel do MDE avaliado, são calculadas então as diferenças absolutas e relativas entre o segundo e o primeiro para cada ponto de controle. A partir da diferença relativa, é feito então o cálculo do EMQ e, a partir da diferença absoluta, é feito o cálculo da TV para as escalas definidas, de modo que é calculado o percentual das diferenças encontradas para cada ponto de controle que seja correspondente a cada uma das classes definidas para a PEC e para a PEC-PCD. Por fim, são calculadas as estatísticas descritivas para as diferenças relativas e absolutas (valor mínimo e valor máximo, primeiro e terceiro quartis; mediana; média; e desvio padrão).

RESULTADOS

ALGORITMOS DE AUTOMATIZAÇÃO DA AVALIAÇÃO DA ACURÁCIA VERTICAL DOS MDES COM BASE NO PEC E NO PEC-PCD

Conforme já mencionado, os algoritmos desenvolvidos para automatização da avaliação da acurácia vertical dos MDEs com base no PEC e no PEC-PCD funcionam da mesma forma, executando os mesmos procedimentos, tendo somente como diferença a adequação aos limiares para cada classe do PEC e do PEC-PCD. Dessa forma, foi desenvolvido, a partir da linguagem R, duas funções para tal avaliação denominadas de: "pec", que é referente ao PEC; e "pec_pcd", que é referente ao PEC-PCD.

Em ambas as funções, é necessário configurar o diretório de trabalho, que consiste no diretório onde deverão estar os MDEs e o *shape* de pontos de controle, através do seguinte comando:

```
setwd("endereço do diretório")
```

Também é necessária a instalação dos dois pacotes complementares conforme já mencionados, o raster e o rgdal, por meio dos seguintes comandos:

```
install.packages("raster")
```

```
install.packages("rgdal")
```

A função "pec" e "pec_pcd" possuem dois argumentos: "mde_leitura", referente ao MDE avaliado; e "pontos_leitura", referente ao *shape* de pontos de controle. Ambos os argumentos devem ser inseridos com seu nome mais a extensão do arquivo entre aspas (ex: "srtm.tif", "pontos_de_controle.shp"). É necessário destacar que o *shape* com os pontos de controle deve conter um campo denominado "z" na tabela de atributos com os valores altimétricos de cada ponto de controle, que serão os valores de referência para avaliação dos MDEs

A primeira etapa da função "pec" e da função "pec_pcd" consiste na ativação dos pacotes raster e rgdal, em seguida, as mesmas definem o primeiro argumento da função como sendo o MDE a ser avaliado e o segundo argumento como sendo o *shape* dos pontos de controle. Na etapa seguinte, é extraído o valor do pixel do MDE correspondente à geolocalização de cada ponto de controle para, dessa forma, serem calculadas as diferenças relativas e absolutas entre os valores altimétricos do MDE e dos pontos de controle para cada ponto. Uma vez tendo os valores dessas diferenças absolutas e relativas; com a primeira é calculada a TV para as escalas definidas (1:50.000, 1:100.000 e 1:250.000) conforme os valores da tabela 1 para a função "pec" e da tabela 2 para a função "pec_pcd"; e com a segunda é calculado o EMQ. Por fim, são calculadas as estatísticas descritivas das diferenças relativas e absolutas. As funções entregam como resultado os percentuais referentes a cada classe da TV para cada escala avaliada, o EMQ e as estatísticas descritivas das diferenças relativas e absolutas.

O *script* da função "pec" e da função "pec_pcd" estão disponíveis para download respectivamente em:

<https://drive.google.com/file/d/1Fb9m9wz4t0YpjM82qDRTZp0AhMV7I2BR/view?usp=sharing>

<https://drive.google.com/file/d/171fNrMYLlwW5wFUKH64iiEALzz1YNkar/view?usp=sharing>

AVALIAÇÃO DA ACURÁCIA VERTICAL DOS MDES

A Tabela 4 apresenta os resultados do EMQ para os MDEs avaliados. O SRTM foi o que obteve melhor resultado, seguido pelo ASTER GDEM, Topodata e SRTM EMBRAPA. Para a escala 1:50.000: o EMQ do SRTM está dentro do limite da classe A para o PEC e da classe B para o PEC-PCD; o EMQ do ASTER GDEM e o EMQ do Topodata estão dentro do limite da classe B para o PEC e da classe C para o PEC-PCD; e o EMQ do SRTM EMBRAPA não está dentro do limite de nenhuma classe do PEC e do PEC-PCD. Para a escala 1:100.000, o EMQ do SRTM, o EMQ do ASTER GDEM e o EMQ do Topodata estão dentro do limite da classe A do PEC e do PEC-PCD; e o EMQ do SRTM EMBRAPA está dentro do limite da classe A do PEC e da classe

B do PEC-PCD. Por fim, para a escala 1:250.000, os valores de EMQ de todos os MDEs avaliados estão dentro do limite da classe A do PEC e do PEC-PCD (Tabelas 1, 2 e 4).

Tabela 4 – Valores do EMQ em metros para os MDEs avaliados:

MDE	Topodata	ASTER GDEM	SRTM	SRTM EMBRAPA
EMQ	8,0	7,6	6,7	11,7

A Tabela 5 apresenta os resultados da TV para os MDEs avaliados. Para a escala 1:50.000: o SRTM está dentro do limite da classe B do PEC e da classe C do PEC-PCD; o Topodata e o ASTER GDEM estão dentro do limite da classe C do PEC e da classe D do PEC-PCD; e o SRTM EMBRAPA não está dentro do limite de nenhuma classe do PEC e do PEC-PCD. Para a escala 1:100.000: o ASTER GDEM, o Topodata e o SRTM estão dentro do limite da classe A do PEC e do PEC-PCD; e o SRTM EMBRAPA está dentro do limite da classe A do PEC e da classe B do PEC-PCD. Por fim, para a escala 1:250.000, todos os MDEs avaliados estão dentro do limite da classe A do PEC e do PEC-PCD (Tabelas 1, 2 e 5).

Tabela 5 – Valores da TV para os MDEs avaliados por escala avaliada (destacado em vermelho as classes nos quais os valores atingem percentuais superiores a 90%):

1:50.000						
Varição - MDE / Pts de Controle	Classe PEC	Classe PEC-PCD	Topodata (%)	ASTER GDEM (%)	SRTM (%)	SRTM EMBRAPA (%)
0 - 5,5 m	A	A	62,78	55,51	70,34	55,87
0 - 10 m	A	B	83,80	83,44	89,70	74,59
0 - 12 m	B	C	89,42	89,06	92,37	79,41
0 - 15 m	C	D	93,09	95,18	95,82	84,16
> 15 m			6,91	4,82	4,18	15,84
1:100.000						
Varição - MDE / Pts de Controle	Classe PEC	Classe PEC-PCD	Topodata (%)	ASTER GDEM (%)	SRTM (%)	SRTM EMBRAPA (%)
0 - 13,7 m	A	A	92,01	92,58	94,53	81,79
0 - 25 m	A	B	98,70	99,57	99,42	94,02
0 - 30 m	B	C	99,50	99,86	99,57	96,83
0 - 37,5 m	C	D	99,71	100,00	99,93	98,56
> 37,5 m			0,29	0,00	0,07	1,44
1:250.000						
Varição - MDE / Pts de Controle	Classe PEC	Classe PEC-PCD	Topodata (%)	ASTER GDEM (%)	SRTM (%)	SRTM EMBRAPA (%)
0 - 27 m	A	A	99,06	99,86	99,50	95,54
0 - 50 m	A	B	99,93	100,00	100,00	99,78
0 - 60 m	B	C	100,00	100,00	100,00	99,86
0 - 75 m	C	D	100,00	100,00	100,00	100,00
> 75 m			0,00	0,00	0,00	0,00

Sendo assim, a avaliação dos MDEs com base no PEC e no PEC-PCD aponta que: o Topodata e o ASTER GDEM obtiveram, para a escala 1:50.000, classe C para o PEC e classe D para o PEC-PCD e, para as escalas 1:100.000 e 1:250.000, classe A para o PEC e para o PEC-PCD; o SRTM obteve, para a escala 1:50.000, classe B para o PEC e classe C para o PEC-PCD e, para as escalas 1:100.000 e 1:250.000, classe A para o PEC e para o PEC-PCD; e o SRTM EMBRAPA, para a escala 1:50.000, não ficou dentro dos limites das classes do PEC e do PEC-PCD, para a escala 1:100.000, obteve classe A para o PEC e classe B para o PEC-PCD e, para a escala 1:250.000, obteve classe A para o PEC e para o PEC-PCD (Tabela 6). Dessa forma, nessa avaliação o SRTM foi o que obteve melhores resultados, seguido pelo ASTER GDEM, Topodata e o SRTM EMBRAPA.

Tabela 6 – Classificação dos MDEs com base no PEC e no PEC-PCD:

MDE	1:50.000		1:100.000		1:250.000	
	Classe PEC	Classe PEC-PCD	Classe PEC	Classe PEC-PCD	Classe PEC	Classe PEC-PCD
Topodata	C	D	A	A	A	A
ASTER GDEM	C	D	A	A	A	A
SRTM	B	C	A	A	A	A
SRTM EMBRAPA	-	-	A	B	A	A

As tabelas 7 e 8 apresentam, respectivamente, as estatísticas descritivas das diferenças relativas e absolutas entre os valores altimétricos dos MDEs e os valores altimétricos dos seus pontos de controle correspondentes. Tais resultados confirmam os melhores resultados obtidos pelo SRTM na avaliação com base no PEC e no PEC-PCD, assim como também confirmam os piores resultados obtidos pelo SRTM EMBRAPA.

Tabela 7 – Estatística descritiva das diferenças relativas entre os valores altimétricos dos MDEs e dos pontos de controle correspondentes:

Diferença Relativa	Topodata	ASTER GDEM	SRTM	SRTM EMBRAPA
Média	4,52	1,51	3,66	5,02
Valor Mínimo	-32,60	-23,40	-20,69	-41,00
Valor Máximo	52,53	35,79	38,46	71,06
1º Quartil	1,16	-3,04	0,54	0,44
Mediana	3,51	1,73	2,97	3,28
3º Quartil	6,99	6,18	5,82	8,41
Desvio Padrão	6,58	7,43	5,58	10,61

Tabela 8 – Estatística descritiva das diferenças absolutas entre os valores altimétricos dos MDEs e dos pontos de controle correspondentes:

Diferença Absoluta	Topodata	ASTER GDEM	SRTM	SRTM EMBRAPA
Média	5,68	5,90	4,74	7,81
Valor Mínimo	0,00	0,01	0,00	0,00
Valor Máximo	52,53	35,79	38,46	71,06
1º Quartil	2,01	2,33	1,59	2,02
Mediana	4,08	4,81	3,53	4,62
3º Quartil	7,59	8,34	6,20	10,16
Desvio Padrão	5,60	4,76	4,69	8,77

AVALIAÇÃO DA ACURÁCIA VERTICAL DOS MDES POR CONFIGURAÇÃO TOPOGRÁFICA DO TERRENO

O cálculo da correlação linear da declividade com as diferenças altimétricas absolutas entre os MDEs e os pontos de controle (Tabela 9) mostra que há uma moderada correlação positiva para os MDEs Topodata, SRTM EMBRAPA e SRTM, nessa ordem. De forma, que as diferenças altimétricas absolutas tendem a crescer com o crescimento da declividade para esses MDEs. Já o MDE ASTER GDEM apresentou uma correlação quase nula.

Tabela 9 – Correlação linear entre a declividade e as diferenças altimétricas absolutas entre os MDEs e os pontos de controle:

Topodata	ASTER GDEM	SRTM	SRTM EMBRAPA
0,4653	0,0556	0,3662	0,4086

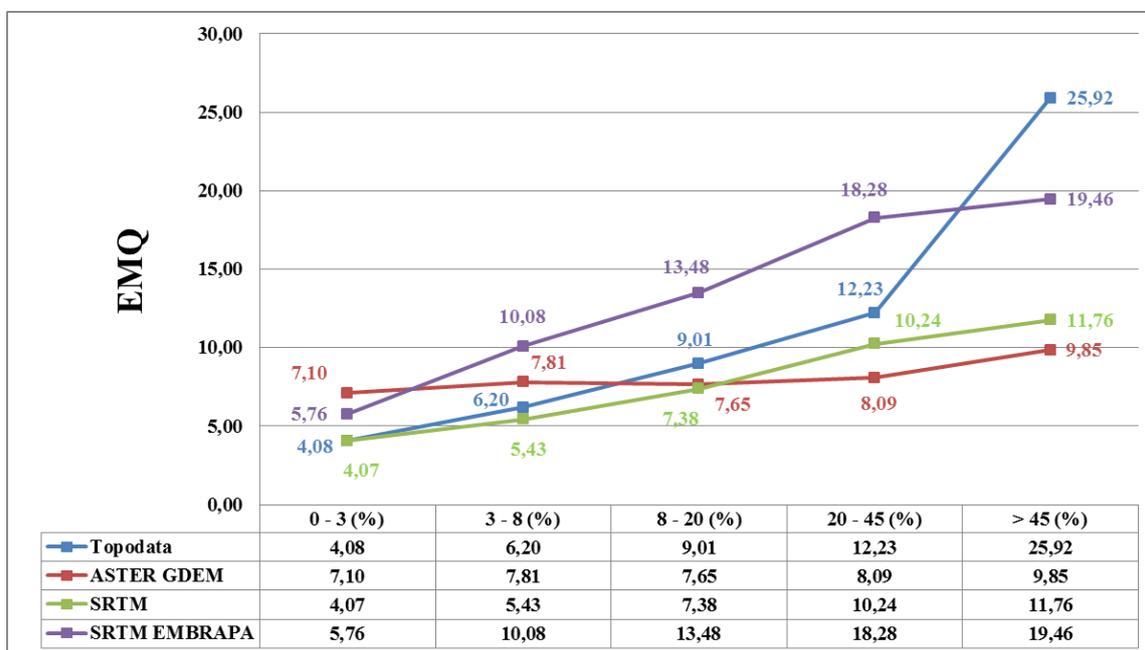
Conforme já mencionado, os pontos de controle foram agrupados por classes de declividade (Tabela 3), visando a avaliação da acurácia vertical dos MDEs por configuração topográfica do terreno. A tabela 10 apresenta a distribuição do quantitativo de pontos de controle por faixa de declividade, demonstrando que a maior parte dos pontos de controle está nas faixas de declividade menores que 20% e que somente nove pontos de controle estão na faixa de declividade maior do que 45%. Tal distribuição dos pontos de controle pode afetar os resultados das análises executadas, contudo a mesma ocorre por conta da limitação de acesso às área de declividade acentuada.

Tabela 10 – Número de pontos de controle por faixa de declividade:

Relevo	Faixa (%)	Área (km²)	Pts de Controle
Plano	0 - 3	10.848	462
Suave Ondulado	3 - 8	4.018	301
Ondulado	8 - 20	6.314	402
Forte Ondulado	20 - 45	14.560	215
Montanhoso e Escarpado	Acima de 45	8.080	9

Para cada faixa de declividade foi calculado o EMQ dos MDEs avaliados (Figura 5). Fica evidente nos resultados que os valores de EMQ tendem a ser maiores com o aumento da faixa de declividade, tal comportamento ocorre para todos os MDEs: Topodata, ASTER GDEM, SRTM e SRTM EMBRAPA. Vale destacar que a variação dos valores de EMQ pelo aumento da declividade é mais acentuada nos MDEs Topodata e SRTM EMBRAPA, que são MDEs desenvolvidos a partir dos dados primários do SRTM. Contudo, o SRTM não apresentou tamanha variação e, no caso do ASTER GDEM, essa tendência não é tão nítida.

Figura 5 – EMQ por faixa de declividade para os MDEs avaliados.



Em relação à TV, a tabela 11 apresenta o percentual referente aos pontos que estão dentro dos limites da classe A do PEC e do PEC-PCD para as escalas 1:50.000, 1:100.000 e 1:250.000. Tal resultado demonstrou um comportamento semelhante ao do EMQ, de forma que os valores de TV tenderam a ser piores com o aumento da declividade.

Tabela 11 – Valores da TV dos MDEs para a classe A do PEC e do PEC-PCD por faixa de declividade:

1:50.000								
MDE	Topodata (%)		ASTER (%)		SRTM (%)		SRTM EMBRAPA (%)	
Declividade (%)	PEC-PCD A	PEC A	PEC-PCD A	PEC A	PEC-PCD A	PEC A	PEC-PCD A	PEC A
0 - 3	85,7	97,4	56,5	86,6	86,8	98,3	80,3	94,4
3 - 8	67,8	92,0	57,8	84,1	72,8	93,4	56,1	76,4
8 - 20	44,5	73,6	53,7	81,6	62,4	85,6	41,3	64,2
20 - 45	41,9	63,7	54,4	79,5	47,0	74,9	30,7	49,8
> 45	25,0	37,5	37,5	75,0	50,0	62,5	27,5	40,0
1:100.000								
MDE	Topodata (%)		ASTER (%)		SRTM (%)		SRTM EMBRAPA (%)	
Declividade (%)	PEC-PCD A	PEC A	PEC-PCD A	PEC A	PEC-PCD A	PEC A	PEC-PCD A	PEC A
0 - 3	99,8	100,0	94,6	99,4	99,8	99,8	96,8	99,1
3 - 8	96,3	99,7	91,4	99,3	98,5	100,0	85,7	96,7
8 - 20	89,8	99,0	92,5	100,0	92,3	99,8	72,4	92,0
20 - 45	75,3	94,9	90,2	99,5	83,7	97,2	61,9	82,8
> 45	37,5	75,0	87,5	100,0	62,5	100,0	55,0	70,0
1:250.000								
MDE	Topodata (%)		ASTER (%)		SRTM3 (%)		SRTM EMBRAPA (%)	
Declividade (%)	PEC-PCD A	PEC A	PEC-PCD A	PEC A	PEC-PCD A	PEC A	PEC-PCD A	PEC A
0 - 3	100,0	100,0	100,0	100,0	99,8	100,0	99,4	100,0
3 - 8	100,0	100,0	99,3	100,0	100,0	100,0	98,0	100,0
8 - 20	99,3	100,0	100,0	100,0	99,8	100,0	94,5	99,8
20 - 45	96,3	100,0	100,0	100,0	97,7	100,0	85,6	99,1
> 45	75,0	87,5	100,0	100,0	100,0	100,0	80,0	90,0

A tabela 12 apresenta a classificação dos MDEs com base no PEC e no PEC-PCD por faixa de declividade: na escala 1:50.000, nas faixas de declividade de até 20%, o Topodata e o SRTM apresentam melhores resultados, e na faixa de declividade acima de 20%, o ASTER GDEM foi o melhor avaliado; na escala 1:100.000, o ASTER GDEM e o SRTM obtiveram classe A do PEC e do PEC-PCD nas faixas de declividade de até 20%, mas nas faixas de declividade de 20% até 45%, somente o ASTER GDEM obteve classe A do PEC e do PEC-PCD; e, na escala 1:250.000, todos os MDEs obtiveram classe A do PEC e do PEC-PCD nas faixas de declividade de até 20%, mas somente o ASTER GDEM e o SRTM também obtiveram classe A do PEC e do PEC-PCD nas faixas de declividades superiores a 20% (Tabela 12).

Tabela 12 – Classificação dos MDEs com base no PEC e no PEC-PCD por faixa de declividade:

1:50.000								
MDE	Topodata		ASTER		SRTM		SRTM EMBRAPA	
Declividade (%)	PEC	PEC-PCD	PEC	PEC-PCD	PEC	PEC-PCD	PEC	PEC-PCD
0 - 3	A	B	B	C	A	B	A	B
3 - 8	A	B	C	D	A	B	-	-
8 - 20	C	D	C	D	C	D	-	-

20 - 45	-	-	C	D	-	-	-	-
> 45	-	-	-	-	-	-	-	-

1:100.000

MDE	Topodata		ASTER		SRTM		SRTM EMBRAPA	
	PEC	PEC-PCD	PEC	PEC-PCD	PEC	PEC-PCD	PEC	PEC-PCD
Declividade (%)								
0 - 3	A	A	A	A	A	A	A	A
3 - 8	A	A	A	A	A	A	A	B
8 - 20	A	B	A	A	A	A	A	B
20 - 45	A	B	A	A	A	B	C	D
> 45	-	-	A	B	A	B	C	D

1:250.000

MDE	Topodata		ASTER		SRTM		SRTM EMBRAPA	
	PEC	PEC-PCD	PEC	PEC-PCD	PEC	PEC-PCD	PEC	PEC-PCD
Declividade (%)								
0 - 3	A	A	A	A	A	A	A	A
3 - 8	A	A	A	A	A	A	A	A
8 - 20	A	A	A	A	A	A	A	A
20 - 45	A	A	A	A	A	A	A	B
> 45	A	B	A	A	A	A	A	B

COMPARAÇÃO ENTRE OS MDES AVALIADOS E O MDE RJ25 POR ÁLGEBRA DE MAPAS

Na comparação entre o MDE Topodata e o MDE RJ25 (Figura 6), fica evidente que as maiores diferenças positivas são percebidas nas vertentes voltadas para o sul, que são as que possuem maior declividade no caso do estado do Rio de Janeiro, o que reforça o fato do MDE Topodata possuir uma menor acurácia vertical nas áreas com maiores declividades. Algumas áreas de planícies apresentam focos relevantes de diferenças negativas entre os MDEs. Outro ponto em destaque é a presença de uma faixa latitudinal que não segue o padrão dominante de diferenças altimétricas, o que sugere alguma limitação dos procedimentos geoestatísticos utilizados para a elaboração do MDE Topodata, uma vez que tal faixa não se repete no MDE SRTM. A distribuição percentual das diferenças mostra que quase 45% das diferenças altimétricas entre os MDEs Topodata e RJ25 está entre a faixa de -5 a 5 metros, de forma que um pouco mais de 90% das diferenças absolutas são de até 20 metros, tendo uma predominância de diferenças positivas.

Na comparação entre o MDE ASTER GDEM e o MDE RJ25 (Figura 7), também se percebe diferenças positivas nas vertentes voltadas para o sul, ainda que não na mesma dimensão do MDE Topodata. Algumas áreas em planícies costeiras apresentam focos de grandes diferenças

positivas entre os MDEs, contudo também se observa diferenças negativas relevantes em áreas de planícies, assim como ocorreu com o MDE Topodata. A distribuição percentual das diferenças mostra que quase 35% das diferenças altimétricas entre os MDEs ASTER GDEM e RJ25 está entre a faixa de -5 a 5 metros, de forma que também um pouco mais de 90% das diferenças absolutas são de até 20 metros.

Na comparação entre o MDE SRTM e o MDE RJ25 (Figura 8), se repete ainda mais fortemente o fato das maiores diferenças positivas serem percebidas nas vertentes voltadas para o sul, que são as que possuem maior declividade no caso do estado do Rio de Janeiro, reforçando o fato do MDE SRTM possuir uma menor acurácia vertical nas áreas com maiores declividades, contudo era esperado que esse comportamento fosse maior para o caso do MDE Topodata, uma vez que mesmo apresentou uma menor acurácia vertical para áreas de maior declividade do que o SRTM. Sugere-se, então, que outros fatores, como presença de vegetação densa, imprecisões do MDE RJ25 ou geometria de aquisição dos dados, também podem ter interferido para que ocorra essa forte concentração de diferenças positivas nas vertentes voltadas para o sul. As áreas em planícies também apresentam alguns focos de diferenças negativas relevantes entre os MDEs, como ocorreram com os MDEs anteriores. A distribuição percentual das diferenças mostra que cerca de 40% das diferenças altimétricas entre os MDEs SRTM e RJ25 está entre a faixa de -5 a 5 metros, de forma que cerca de 88% das diferenças absolutas são de até 20 metros.

Na comparação entre o MDE SRTM EMBRAPA e o MDE RJ25 (Figura 9), fica evidente fato das maiores diferenças positivas e negativas serem percebidas nas áreas com declive, reforçando o fato de o MDE SRTM EMBRAPA obter uma grande piora da acurácia vertical nas áreas não planas. A imagem diferença entre o MDE SRTM EMBRAPA e o MDE RJ25 reforça os resultados obtidos anteriores que demonstraram que o MDE SRTM EMBRAPA possui a menor acurácia vertical dentre os modelos avaliados. A distribuição percentual das diferenças reforça ainda mais tal afirmação ao demonstrar que somente cerca de 25% das diferenças altimétricas entre os MDEs SRTM EMBRAPA e o MDE RJ25 está entre a faixa de -5 a 5 metros e um pouco mais de 60% das diferenças absolutas são de até 20 metros, um resultado relevantemente inferior se comparado aos obtidos pelos MDEs Topodata, ASTER GDEM e SRTM.

Figura 6 – Diferença altimétrica da subtração do MDE Topodata pelo MDE RJ25.

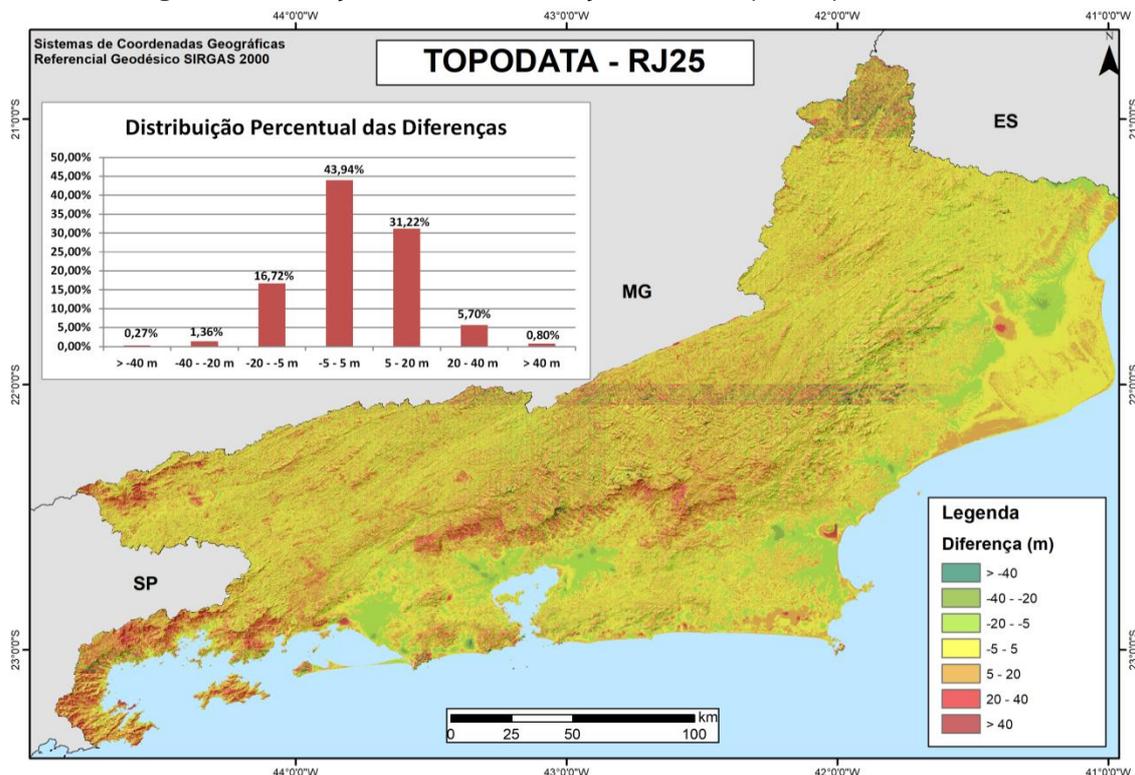


Figura 7 – Diferença altimétrica da subtração do MDE ASTER GDEM pelo MDE RJ25.

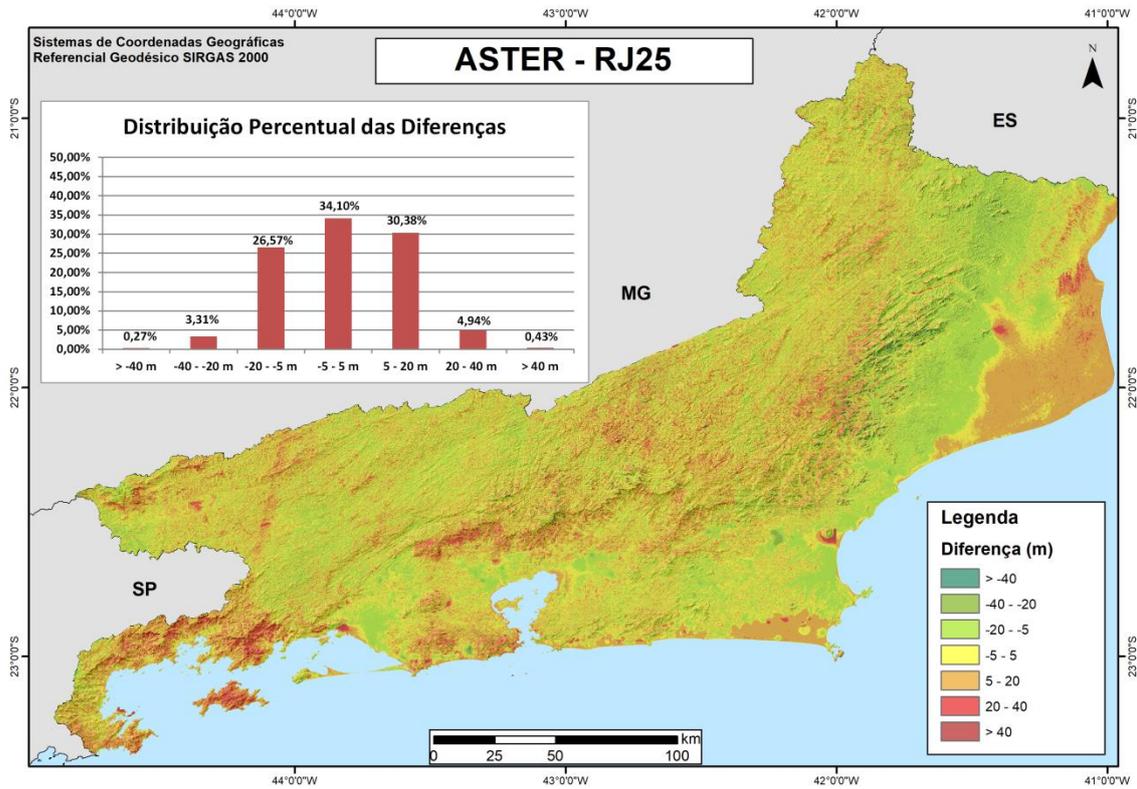


Figura 8 – Diferença altimétrica da subtração do MDE SRTM pelo MDE RJ25.

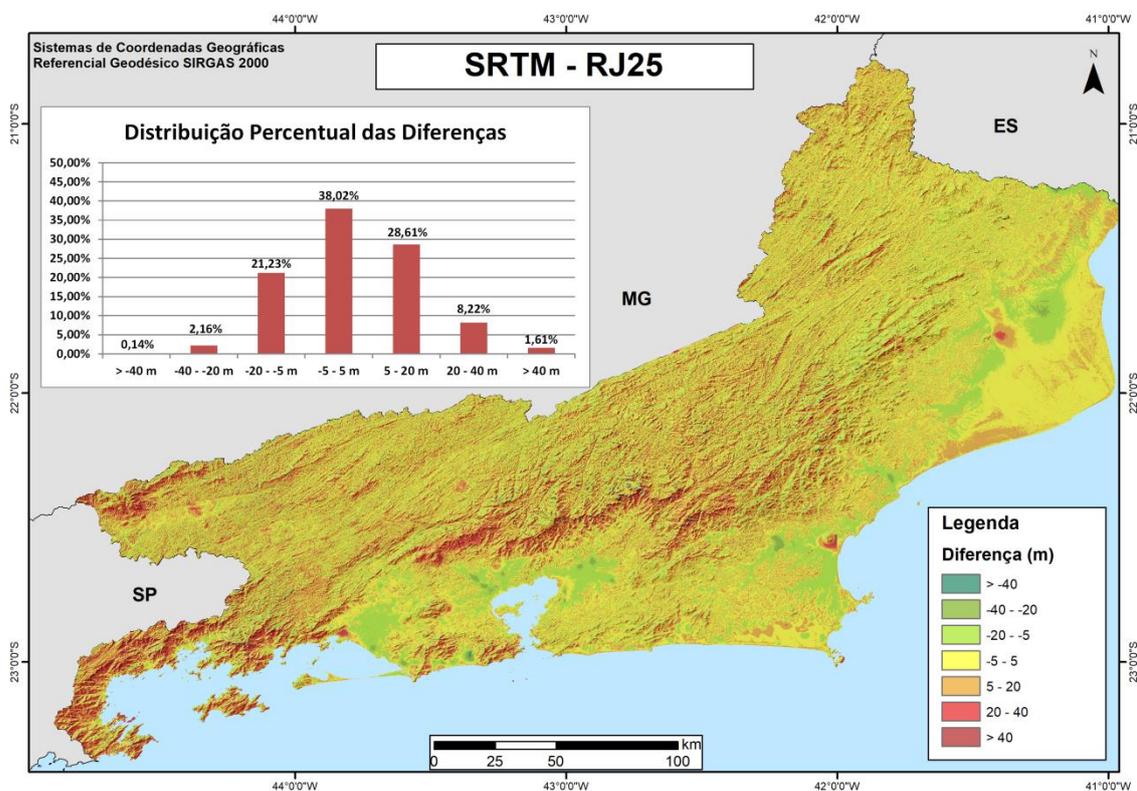
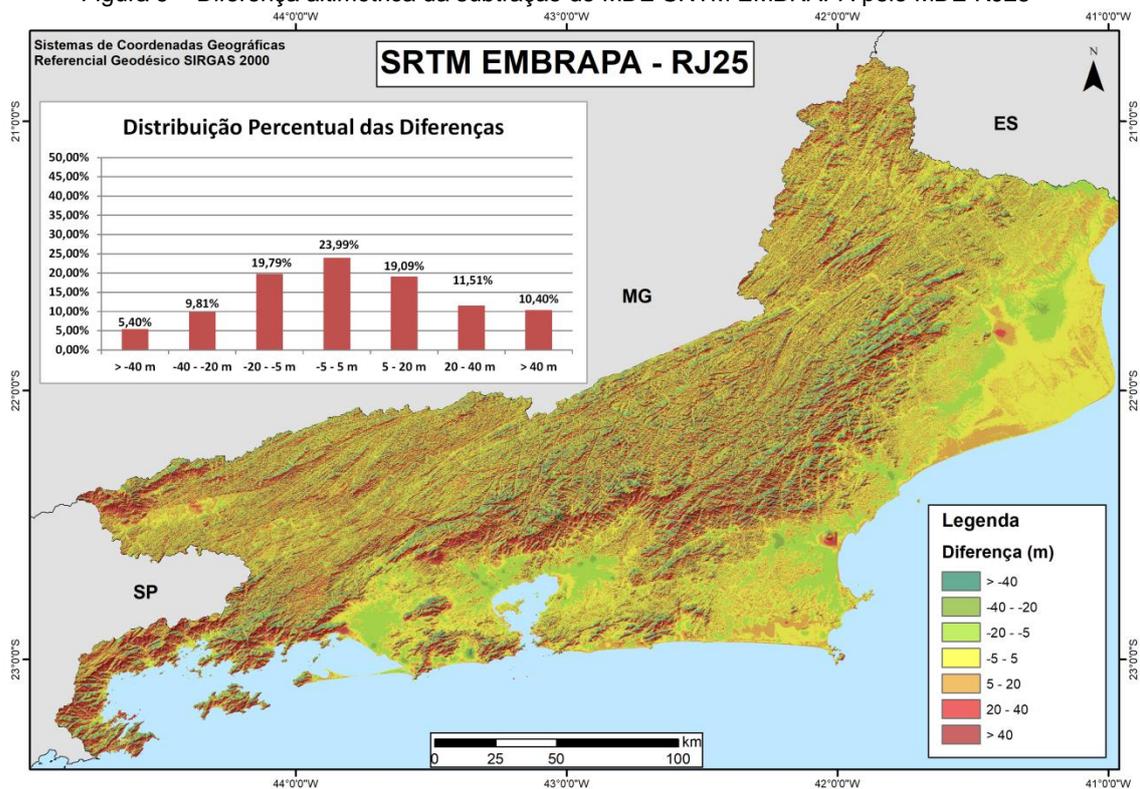


Figura 9 – Diferença altimétrica da subtração do MDE SRTM EMBRAPA pelo MDE RJ25



CONSIDERAÇÕES FINAIS

Uma vez que a acurácia vertical dos MDEs oriundos de sensoriamento remoto varia espacialmente, há a necessidade de se avaliar a acurácia vertical dos MDEs para cada nova área a ser estudada, portanto os algoritmos desenvolvidos nesse estudo são importantes ferramentas que permitem a automatização dos procedimentos para tal avaliação com base nos parâmetros do PEC e do PEC-PCD a partir de um software livre. Consistindo assim, em um significativo ganho de tempo na avaliação e na escolha do melhor MDE para a área a ser estudada.

Na avaliação dos MDEs com base no PEC e no PEC-PCD, ficou evidente que o MDE SRTM apresentou melhores resultados, seguido pelos ASTER GDEM e pelo Topodata. O MDE SRTM EMBRAPA obteve resultados significativamente inferiores aos demais, sendo o único que não obteve classe A para a PEC-PCD na escala 1:100.000.

A avaliação da acurácia vertical por configuração topográfica do terreno evidenciou que há uma tendência de piora da acurácia vertical com o aumento da declividade em todos os MDEs, mas principalmente nos MDEs Topodata e SRTM EMBRAPA. O MDE ASTER GDEM foi o que apresentou o comportamento mais regular em relação à declividade. Sendo assim, sugere-se que os bons resultados obtidos pelos MDEs SRTM e Topodata na avaliação anterior com base no PEC e no PEC-PCD são frutos da boa acurácia dos mesmos em áreas de baixas declividades. Vale reforçar que a maior parte dos pontos de controle está nas áreas de declividades inferiores a 20°, o que pode afetar relevantemente os resultados obtidos na avaliação anterior com base no PEC e no PEC-PCD.

Por fim, a comparação entre os MDEs avaliados e o MDE RJ25 por álgebra de mapas mostrou que o MDE ASTER GDEM apresenta uma regularidade maior na distribuição espacial das diferenças altimétricas, de forma que não obteve grandes concentrações espaciais de altas diferenças como visto em relação aos MDEs Topodata, SRTM e SRTM EMBRAPA, nos quais foi possível perceber uma grande concentração de altas diferenças altimétricas nas áreas de maior declividade.

Para estudos futuros, recomenda-se uma distribuição mais regular dos pontos de controle em relação à inclinação do terreno. A avaliação da acurácia vertical em relação ao tipo uso do solo também é recomendada, uma vez que o tamanho dos objetos presentes na superfície do terreno pode interferir significativamente na altimetria obtida pelos MDEs avaliados.

REFERÊNCIAS

ABRAMS, M. ASTER. Data products for the high spatial resolution imager on NASA's EOS-AM1 platform. *Int. J. Remote Sens.* v. 21, 847-861, 2000.

<https://doi.org/10.1080/014311600210326>

ANDERS, N. S.; SEIJMONSBERGEN, A. C.; BOUTTEN, W. Segmentation optimization and stratified object-based analysis for semi-automated geomorphological mapping. *Remote Sensing of Environment*, v. 115, n. 12, p. 2976-2985, 2011.

<https://doi.org/10.1016/j.rse.2011.05.007>

ASPRS. Interim Accuracy Standards for Large-Scale Maps. 1989.

ASSELEN, S.; SEIJMONSBERGEN, A. C. Expert-driven semi-automated geomorphological mapping for a mountainous area using a laser DTM. *Geomorphology*, v. 78, n. 3.4, p. 309-320, 2006.

<https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2006.01.037>

BARROS, R. S. Avaliação da Altimetria de Modelos Digitais de Elevação Obtidos a partir de Sensores Orbitais. Programa de Pós-Graduação em Geografia, Depto. de Geografia, IGEO/UFRJ, 2006. 195p. Tese de Doutorado - Universidade Federal do Rio de Janeiro.

BIVAND, R.; KEITT, T.; ROWLINGSON, B. rgdal: Bindings for the Geospatial Data Abstraction Library. 2016.

BLASCHKE, T. Object based image analysis for remote sensing. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, v. 65, n. 1, p. 2-16, 2010.

<https://doi.org/10.1016/j.isprsjprs.2009.06.004>

BRASIL 1984. Decreto nº 89.817 de 20 de Julho de 1984.

BRASIL. Especificação Técnica para a Aquisição de Dados Geoespaciais Vetoriais (ET-ADGV) Versão 2.1.3. Diretoria de Serviço Geográfico do Exército Brasileiro. 2011.

BROWN, R. Geomorphons: landform and property predictions in a glacial moraine in Indiana landscapes. *Catena*, v. 142, p. 66-76, 2016.

<https://doi.org/10.1016/j.catena.2016.01.002>

CARVALHO, T. M.; LATRUBESSE, E. M. Aplicação de modelos digitais do terreno (MDT) em análises macrogeomorfológicas: o caso da bacia hidrográfica do Araguaia. *Revista Brasileira de Geomorfologia*, v. 5, 85-93, 2004.

<https://doi.org/10.20502/rbg.v5i1.34>

DE FREITAS, S. R. C.; FERREIRA, V. G.; PALMEIRO, A. S.; CARVALHO, J. L.B. de; SILVA, L. F. Analysis of the geopotential anomalous component at Brazilian Vertical Datum region based on the imarui lagoon system. *Gravity, Geoid and Earth Observation, International Association of Geodesy Symposia*, 2010.

https://doi.org/10.1007/978-3-642-10634-7_42

DRAGUT, L.; EISANK, C. Automated object-based classification of topography from SRTM data. *Geomorphology*, v. 141-142, n. 1, p. 21-33, 2012.

<https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2011.12.001>

ENDRENY, T.A.; WOOD, E.F.; LETTENMAIER, D.P. Satellite-derived digital elevation model accuracy: hydrogeomorphological analysis requirements. *Hydrological Processes*. v. 14, 1-20, 2000.

[https://doi.org/10.1002/\(SICI\)1099-1085\(200001\)14:1<1::AID-HYP918>3.3.CO;2-R](https://doi.org/10.1002/(SICI)1099-1085(200001)14:1<1::AID-HYP918>3.3.CO;2-R)

FARR, T. G.; ROSEN, P. A.; CARO, E.; CRIPPEN, R.; DUREN, R.; HENSLEY, S.; KOBRICK, M.; PALLER, M.; RODRIGUEZ, E.; ROTH, L.; SEAL, D.; SHAFFER, S.; SHIMADA, J.; UMLAND, J.; WERNER, M.; OSKIN, M.; BURBANK, D.; ALSDORF, D. The Shuttle Radar Topography Mission. *Reviews of Geophysics*, v.45, p.1-33, 2007.

<https://doi.org/10.1029/2005RG000183>

FERREIRA, V. G. Análise da componente anômala do geopotencial no Datum Vertical Brasileiro com base no Sistema Lagunar de Imarui, SC. Dissertação - Curso de Pós-Graduação em Ciências Geodésicas, Setor de Ciências da Terra, Universidade Federal do Paraná. Curitiba - PR. 115pp. 2008.

FERREIRA, V. G.; DE FREITAS, S. R. C.; HECK, B. A separação entre o geoídeo e o quase geoídeo: uma análise no contexto brasileiro. *Revista Brasileira de Cartografia*, n° 63 Edição Especial 40 Anos, 2011.

FRANKEL, K. L.; DOLAN, J. F. Characterizing arid region alluvial fan surface roughness with airborne laser swath mapping digital topographic data. *J. Geophys. Res.* 112, F02025, 2007.

<https://doi.org/10.1029/2006JF000644>

GROHMANN, C. H. Morphometric analysis in geographic information systems: applications of free software GRASS and R. *Computers & Geosciences*, v. 30, n. 9-10: 1055-1067, 2004.

<https://doi.org/10.1016/j.cageo.2004.08.002>

HIJMANS, R. J. raster: Geographic Data Analysis and Modeling. R package version 2.5-2. 2015.

HIRT, C.; FILMER, M. S.; FEATHERSTONE, W. E. Comparison and validation of the recent freely-available ASTER-GDEM ver1, SRTM ver4,1 and GEODATA DEM-9S ver3 digital elevation models over. Australia. 2010. <https://doi.org/10.1080/08120091003677553>

KOBAL, M.; CEGLAR, A.; ELER, K.; MEDVED-CVILK, B.; HONZAK, L.; SIMONCIC, P.; HLADNIK, D. On the use of R programming language in the analyses of spatial data. *Acta Silviculturae Ligni*, v. 102, p. 55-62, 2013. <https://doi.org/10.20315/ASL.102.5>

LINDSAY, J. B.; EVANS, M. G. The influence of elevation error on the morphometrics of channel networks extracted from DEMs and the implications for hydrological modelling. *Hydrological Processes*. v. 22, 1588-1603, 2008. <https://doi.org/10.1002/hyp.6728>

LUZ, R. T.; DE FREITAS, S. R. C.; DALAZOANA, R.; Acompanhamento do Datum Altimétrico IMBITUBA através das Redes Altimétrica e Maregráfica do Sistema Geodésico Brasileiro. VII Congresso Internacional de Ciencias de la Tierra, 2002.

MACÊDO, R. J. A.; FLOQUET, S. Análise Digital de Terreno Utilizando a Linguagem Computacional R: Exemplo de Aplicação. *Revista Brasileira de Geomorfologia*, v. 18, 2017.

<https://doi.org/10.20502/rbg.v18i2.1158>

MARTINS, E. S. F. Avaliação Exatidão Cartográfica de Dados SRTM e Atualização da Carta Plani-Altimétrica Salinópolis - NE do Pará. Programa de Pós-Graduação em Geologia e Geoquímica, IGEO/UFGPA, 2010. 195p. Dissertação de Mestrado - Universidade Federal do Pará.

- MERCHANT, D. C. Spatial accuracy standards for large scale line maps. AMERICAN CONGRESS ON SURVEYING AND MAPPING. USA - Denver/CO, p. 222-231, 1982.
- METCALFE, P.; BEVEN, K.; FREER, J. Dynamic TOPMODEL: A new implementation in R and its sensitivity to time and space steps. *Environmental Modelling & Software*, v. 72, p. 155-172, 2015. <https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2015.06.010>
- MICELI, B. S.; DIAS, F. M.; SEABRA, F. M.; SANTOS, P. R. A.; FERNANDES, M. C. Avaliação Vertical de Modelos Digitais de Elevação (MDEs) em Diferentes Configurações Topográficas para Médias e Pequenas Escalas. *Revista Brasileira de Cartografia*, n. 63/01, 191-201, 2011.
- MIRANDA, E. E. de; (Coord.). *Brasil em Relevo*. Campinas: Embrapa Monitoramento por Satélite, 2005. Disponível em: <<http://www.relevobr.cnpm.embrapa.br>>. Acesso em: 19 Out. 2017.
- MOURA, L. Z.; BIAS, E. S.; BRITES, R. Avaliação da Acurácia Vertical de Modelos Digitais de Elevação (MDEs) nas Bacias do Paranoá e São Batolomeu. *Revista Brasileira de Cartografia*, n. 66/01, 1-15, 2014.
- MOURATIDIS, A.; BRIOLE, P.; KATSAMBALOS, K. SRTM 3" DEM (versions 1, 2, 3, 4) validation by means of extensive kinematic GPS measurements: a case study from North Greece. *International Journal of Remote Sensing*. v. 31, Nº. 23, 2010. <https://doi.org/10.1080/01431160903401403>
- MUKHERJEE, S. J. P.; MUKHERJEE, S.; GHOSH, A.; GARG, R.; MUKHOPADHYAY, A. Evaluation of vertical accuracy of open source Digital Elevation Model (DEM). *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*. v. 21, 205-217, 2013. <https://doi.org/10.1016/j.jag.2012.09.004>
- OMUTO, C. T.; VARGAS, R. R. Re-tooling of regression kriging in R for improved digital mapping of soil properties. *Geoscience Journal*, v. 19, p. 157-165, 2014. <https://doi.org/10.1007/s12303-014-0023-9>
- PATEL, A.; KATIYAR, S. K.; PRASAD, V. Performances evaluation of different open source DEM using Differential Global Positioning System (DGPS). *Egypt J. Remote Sens. Space Sci.* 19, 7-16, 2016. <https://doi.org/10.1016/j.ejrs.2015.12.004>
- RICCOMINI, C. *O Rift Continental do Sudeste do Brasil*. São Paulo, 256 p. (Tese de Doutorado, Depto Geologia, IG/USP). 1989.
- RICCOMINI, C. *Tectonismo gerador e reformador dos depósitos sedimentares Pós-Gondwânicos da porção centro-ocidental do Estado de São Paulo e áreas vizinhas*. São Paulo, 198p. (Tese de Livre Docência, Depto Geologia, IG/USP). 1995.
- RStudio Team. *RStudio: Integrated development for R*. RStudio, Inc., Boston, MA. 2015. Disponível em: <<http://www.rstudio.com>>. Acessado em: 15/09/2016.
- SAMPAIO, T. V. M.; SOUZA SÁ, E. B.; LIMA, R. A. Modelo Digital de Elevação Misto, interpoladores e formas de relevoderivadas. Um estudo na Serra da Prata - PR. In: SINAGEO - SIMPÓSIO NACIONAL DE GEOMORFOLOGIA, 9, 2012,
- SÁNCHEZ, L.; MARTÍNEZ, W. Avances en el procesamiento unificado de las redes verticales involucradas en SIRGAS. In: SIRGAS Meeting, Montevideo, Uruguay. 2008.
- SANTOS, P. R. A.; GABOARDI, C.; OLIVEIRA, L. C. Avaliação da Precisão Vertical dos Modelos SRTM para a Amazônia. *Revista Brasileira de Cartografia*, n. 58/01, 101-107, 2006.

SILVA, T. M. A Estruturação Geomorfológica do Planalto Atlântico no Estado do Rio de Janeiro. Tese de Doutorado em Geografia, Instituto de Geociências, Universidade Federal do Rio de Janeiro. 2002.

STALEY, D.M., WASKLEWICZ, T.A., BLASZCZYNSKI, J.S. Surficial patterns of debris flow deposition on alluvial fans in Death Valley, CA using airborne laser swath mapping. *Geomorphology*, v. 74, 152-163, 2006. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2005.07.014>

TANG, G.; HUI, Y.; STROBL, J.; LIU, W. The impact of resolution on the accuracy of hydrologic data derived from DEMs. *Journal of Geographical Sciences*. v. 11, 393-401, 2001. <https://doi.org/10.1007/BF02837966>

TOUTIN, T. RADARSAT-2 stereoscopy and polarimetry for 3D mapping. *Canadian Journal of Remote Sensing*, v. 30, n. 3. p. 496-503, 2004. <https://doi.org/10.5589/m03-079>

VALERIANO, M. M. Topodata: guia para utilização de dados geomorfológicos locais. São José dos Campos: INPE, 2008. 72 p.

VALERIANO, M. M.; ROSSETTI, D. F. TOPODATA: Seleção de coeficientes geoestatísticos para o refinamento unificado de dados SRTM. São José dos Campos: INPE, 2008.

VALERIANO, M. M.; ROSSETTI, D. F. Topodata: Brazilian full coverage refinement of SRTM data. *Applied Geography*, v. 32, n. 2, p. 300-309, 2012. <https://doi.org/10.1016/j.apgeog.2011.05.004>

VERHAGEN, P.; DRAGUT, L. Object-based landform delineation and classification from DEMs for archaeological predictive mapping. *Journal of Archaeological Science*, v. 39, n. 3, p. 608-703, 2012. <https://doi.org/10.1016/j.jas.2011.11.001>

VOGT, J. V.; COLOMBO, R.; BERTOLO, F. Deriving drainage networks and catchment boundaries: a new methodology combining digital elevation data and environmental characteristics. *Geomorphology*, v. 53, 281-298, 2003. [https://doi.org/10.1016/S0169-555X\(02\)00319-7](https://doi.org/10.1016/S0169-555X(02)00319-7)

WECHSLER, S. P. Uncertainties associated with digital elevation models for hydrologic applications: a review. *Hydrology and Earth System Sciences*, v. 11, 1481-1500, 2007. <https://doi.org/10.5194/hess-11-1481-2007>

WILSON, J. P.; GALLANT, J. C. Digital terrain analysis. In Wilson, J. P. and Gallant, J. C., editors, *Terrain analysis: principles and applications*, New York: Wiley, p. 29-49, 2000.

WILSON, J. P. Digital terrain modeling. *Geomorphology*, v. 137, 107-121, 2012. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2011.03.012>

Recebido em: 11/05/2018

Aceito para publicação em: 06/06/2019